

Л. А. Боярский

КАФЕДРА ФИЗИКИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Заведующий кафедрой: д-р физ.-мат. наук, проф. Л. А. Боярский
Направление подготовки: 510403 – Физика конденсированного состояния вещества
Базовый институт: Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН
Сервер кафедры: <http://www/che/nsk/su/education/chairs/index.html>

Кадровый состав

Романенко Анатолий Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф.

Батыев Эдуард Газизович, канд. физ.-мат. наук, доц.

Безверхий Петр Петрович, канд. физ.-мат. наук, ассист.

Блинов Александр Геннадьевич, ассист.

История создания кафедры

В 1959 г. чл.-корр. РАН П. Г. Стрелковым в структуре Института теплофизики СО РАН СССР был организован отдел конденсированного состояния вещества (ныне – отдел термодинамических исследований Института неорганической химии СО РАН). Научная направленность отдела определялась кругом задач, которые курировались Советом АН СССР по проблеме «Физика низких температур». Это были исследования широкого спектра свойств конденсированных фаз методами теоретической и экспериментальной физики.

В течение первых 25 лет работы в основном касались проблемы фазовых переходов второго рода и критического состояния вещества. Эта тематика требовала развития целого ряда прецизионных экспериментальных методов, а также новых теоретических подходов.

К 1970 г. накопленный научный потенциал (формально вылившийся в ряд защит докторских и кандидатских диссертаций) позволил Научному совету по проблеме «Физика низких температур» поставить вопрос об открытии в НГУ специализации, базирующейся на указанном отделе. Советом НГУ соответствующее решение было принято. Первые годы специализация была автономной частью сначала кафедры физики полупроводников, а затем кафедры общей физики. Затем мы стали самостоятельной кафедрой.

Специализация

Логика открытия нашей специализации достаточно проста. Глобальная задача фи-

зического факультета, на наш взгляд, заключается в подготовке специалистов – физиков широкого профиля, владеющих не только определенной суммой знаний, но и усвоивших физическое мировоззрение.

Ясно, что глубокое изучение всей физики в целом за четыре или шесть лет обучения на факультете – непосильная задача. Существуют, однако, области нашей науки, изучение которых позволяет достаточно полно усвоить основные идеи современной физики, пути развития науки, экспериментальные методы получения достоверных знаний и основанные на этих знаниях теоретические подходы.

Физика низких температур, а если быть более точным, квантовая физика конденсированного состояния вещества, относится к одному из таких разделов. Изложенные соображения послужили основой при составлении перечня дисциплин. В построении учебного процесса не последнюю роль играет то обстоятельство, что кафедра физики низких температур НГУ – единственная кафедра такого профиля на всем российском пространстве к востоку от Урала. Это налагает на нас особую ответственность.

Эффективность нашей науки может быть проиллюстрирована хотя бы тем, что почти 50 % Нобелевских премий по физике (и некоторые по химии!) были присуждены за достижения в области физики низких температур. Среди лауреатов такие отечественные ученые, как: Л. Д. Ландау, П. Л. Капица, А. А. Абрикосов, В. Л. Гинзбург.

Учебный план кафедры содержал традиционные для низкотемпературной специализации курсы – «Физика нормальных металлов», «Сверхпроводимость и сверхтекучесть», «Низкотемпературный магнетизм», «Основы криогенной техники», а также дисциплины, отражающие интересы физиков Академгородка, – «Фазовые переходы» и «Сверхпроводящая электроника». Следует отметить, что курс «Фазовые переходы» на протяжении ряда лет, вплоть до отъезда за рубеж, читал проф. А. З. Паташинский, лауреат премии им. Л. Д. Ландау, присужденной ему за создание флуктуационной теории фазо-

вых переходов второго рода и критического состояния.

В разные годы на кафедре преподавали д-р физ.-мат. наук Е. Б. Амитин («Физика фазовых переходов»), доценты О. Л. Бандман («Сверхпроводящая электроника»), В. М. Набутовский («Теория сверхпроводимости и сверхтекучести»), Б. Я. Шапиро («Неоднородная сверхпроводимость»), В. Я. Диковский («Слабая сверхпроводимость»), М. П. Рютова («Квантовые жидкости»). Со временем структура курсов изменялась, однако принципы подготовки специалистов остались неизменными. Наиболее серьезная перестройка была проведена в связи с переходом на двухступенчатую систему образования «бакалавр – магистр».

Первая ступень подготовки теперь содержит.

Спецпрактикум. Третий курс, пятый и шестой семестры, 204 ч. Ряд лабораторных задач, связанных с применением хладоагентов, при выполнении которых студенты осваивают начала экспериментальных методов при низких температурах. Это – термометрия в гелиевой и азотной областях температур, явление сверхтекучести, сверхпроводящие свойства металлов и сплавов, диагностика ВТСП, магнетизм редкоземельных металлов и т. п. Преподаватели: канд. физ.-мат. наук П. П. Безверхий и ассист. А. Г. Блинов.

Специальные курсы:

– «Экспериментальная криогеника» – третий курс, пятый, шестой семестры, 68 ч. Термодинамика при низких температурах, техника получения холода, Международная шкала температур, свойства жидкого гелия, сверхтекучесть, изотопы гелия и их смеси, получение сверхнизких температур методами адиабатического размагничивания и растворения изотопов гелия, основы кристаллофизики и структурного анализа, феноменологические теории сверхпроводимости, экспериментальные результаты. Лектор – проф. Л. А. Боярский.

– «Низкотемпературный магнетизм» – четвертый курс, седьмой, восьмой семестры, 68 ч. Магнетизм электронных оболочек, парамагнитные и диамагнитные вещества, теория Ланжевена, магнитные свойства металлов, ферромагнетизм – основные опытные факты и природа ферромагнитного состояния, обменное взаимодействие, приближение эффективного поля и спиновые волны, техническое намагничивание и маг-

нитные материалы, косвенный обмен в металлах и диэлектриках, редкие земли, антиферромагнитное состояние, магнетизм разбавленных сплавов, спиновые стекла, критические явления в магнетиках. Лектор – проф. Л. А. Боярский.

– «Физика нормальных и сверхпроводящих металлов» – четвертый курс, седьмой, восьмой семестры, 68 ч. Квазичастицы в металлах, описание периодической структуры, вторичное квантование, электрон в периодическом поле, классификация твердых тел, модель свободных электронов в металле, поверхность Ферми, частицы в магнитном поле, кинетические явления, теория ферми-жидкости Ландау. Вторая часть курса содержит теорию сверхпроводимости металлов: экспериментальные факты, эффект Купера, теория БКШ, энергетическая щель, теория Гинзбурга – Ландау, сверхпроводники первого и второго рода, промежуточное и смешанное состояния, теория Абрикосова, эффекты Джозефсона. Лектор – доц. Э. Г. Батыев.

– «Высокотемпературная сверхпроводимость» – четвертый курс, седьмой, восьмой семестры, 68 ч. Четвертый курс, все по 68 часов. Особенности кристаллической структуры ВТСП, основные типы структур, мобильная подрешетка, связь между кристаллической решеткой и зонной структурой, поверхности Ферми металлов и ВТСП, особенности структур, основные методы изучения кристаллических структур, температурная зависимость электросопротивления ВТСП, основные ее механизмы, эффект Мейсснера и глубина проникновения магнитного поля в ВТСП-системах, фазовые диаграммы ВТСП – связь свойств с кислородосодержанием, упорядочение в кислородной подсистеме, критические поля, термодинамические свойства ВТСП, теоретические представления о природе ВТСП. Лектор – проф. А. И. Романенко.

В соответствии с принятыми на факультете правилами магистранты изучают шесть полугодовых курсов (все – в течение первого года обучения в магистратуре).

– «Сильно коррелированные электронные системы» – пятый курс, девятый семестр, 36 ч. Электронные корреляции в кристаллах (на примере цепочки атомов водорода), переход Мотта (переход металл – диэлектрик). Модель Хаббарда, сильное взаимодействие в модели Хаббарда: суперобмен, антиферромагнетизм (наполовину за-

полненная зона); слабое взаимодействие в модели Хаббарда: волна спиновой плотности, спектр Ферми-возбуждения, двумерные электроны - квантовый эффект Холла (КЭХ). Основные экспериментальные факты, физическая картина целочисленного КЭХ. Лектор – доц. Э. Г. Батыев.

– «Слабая сверхпроводимость» – пятый курс, десятый семестр, 32 ч. Контакт сверхпроводников – стационарный эффект Джозефсона, связь джозефсоновского тока с разностью фаз сверхпроводящих параметров порядка, джозефсоновский контакт в магнитном поле. Интерференционные явления в джозефсоновских контактах, приборы, основанные на этих явлениях (SQUID), нестационарный эффект Джозефсона. Лектор – доц. Э. Г. Батыев.

– «Физика наноструктур» – пятый курс, девятый семестр, 36 ч. Особенности электрических и магнитных свойств объектов с размерами существенно меньше микрона, проблема самоорганизации в массивах на основе наноструктур и основные физические свойства этих массивов. Лектор – проф. А. И. Романенко.

– «Сверхпроводимость в наноструктурах» – пятый курс, десятый семестр, 32 ч. Особенности электрон-электронного взаимодействия в наноструктурах, влияние кривизны графеновых слоев и ее влияние на электрон-электронное взаимодействие в наноструктурах на основе углерода, влияние взаимодействия между отдельными наноструктурными элементами на сверхпроводящие свойства объемных образцов на их основе. Лектор – проф. А. И. Романенко.

– «Фазовые переходы» – пятый курс, десятый семестр, 32 ч. Развитие представлений о фазовых переходах и об изменениях агрегатного состояния вещества, возникновение представлений о фазовых переходах второго рода и о критическом состоянии – работы Ван-дер-Ваальса и П. Эренфеста, разложение Ландау, область применимости, основы флуктуационной теории фазовых переходов, скейлинг, критические индексы, экспериментальные методы изучения фазовых переходов, метрологические требования, особенности переходов в сильно коррелированных системах на примере ВТСП и магнетиков. Лектор – проф. Л. А. Боярский.

– «Ключевые эксперименты, история и философия физики» – пятый курс, девятый семестр, 36 ч. Курс дополняет гуманитарную составляющую университетского обра-

зования. Здесь рассматриваются не только ключевые эксперименты в области физики конденсированного состояния вещества, особенно в области физики низких температур, но и прослеживаются логика постановки экспериментов теми или иными великими учеными, развитие теоретических представлений.

Научные направления

В 1997 г. на базе кафедры и профилирующих лабораторий был организован учебно-научный центр «Криогеника». Это объединение позволило установить более тесные связи между научными исследованиями и учебным процессом, модернизировать лекционные курсы, включая в них результаты новых исследований.



Преподаватели кафедры. Слева направо: А. Г. Блинов, П. П. Безверхий, Л. А. Боярский, Э. Г. Батыев

Научный потенциал УНЦ (кафедра + отдел) достаточно высок. У нас работают 13 докторов (в том числе академик РАЕН, лауреат Госпремии С. П. Габуда, два лауреата Госпремии РФ Н. К. Мороз и В. Н. Икорский, профессора Л. А. Боярский, Э. В. Матизен и И. Е. Пауков) и 16 кандидатов наук. УНЦ располагает необходимым оборудованием для низкотемпературного эксперимента, в том числе: сверхпроводящим магнитом фирмы Oxford Instruments на 17 Тесла, спектрометрами ядерного магнитного резонанса, вакуумными адиабатическими калориметрами различных модификаций, СКВИД-магнитометрами для исследований в области сверхпроводимости и молекулярного магнетизма, диагностическими установками для изучения ВТСП.

Имеется также доступ по кооперации с другими лабораториями ИНХ к рентгенов-

ским дифрактометрам, различным химическим лабораториям, в том числе для выращивания монокристаллов. Учебный процесс проходит в конференц-зале Криогенного корпуса ИНХ, оборудованном кондиционером для поддержания комфортной температуры, досками для работы мелом, проекционной аппаратурой.

Логика подготовки специалистов состоит в стремлении не только обеспечить студентам возможность овладения определенным кругом знаний в области квантовой физики конденсированного состояния вещества, но и выработать в молодых людях физическое мировоззрение, способность адаптироваться в разных сферах научной и практической деятельности. Информация, касающаяся жизни и деятельности наших выпускников, подтверждает справедливость принятой концепции.

За прошедшие годы на кафедре было подготовлено свыше 160 специалистов. Две трети выпускников работают в разных областях науки, остальные, насколько нам известно, в бизнесе. Как география, так и область применения научных познаний выпускников достаточно широка. Географически это и СО РАН, и вузы Новосибирска, и другие города нашей страны и зарубежья (как ближнего, так и дальнего). Свыше 40 выпускников стали кандидатами наук, несколько человек получили степень доктора философии в зарубежных университетах, пятеро защитили докторские диссертации (двое работают в ИНХ СО РАН, двое – в учреждениях СО РАН в Барнауле и Кызыле, один – в Екатеринбурге), один выпускник работает полным профессором в Израиле.

В лабораториях базового института в настоящее время работают 15 наших выпускников, что составляет примерно 10 % выпуска. Учитывая определенную уникальность кафедры, такую ситуацию следует считать удовлетворительной. Успехи, достигнутые нашими выпускниками в различных учреждениях науки и высшей школы, подтверждают эффективность подготовки специалистов как на факультете в целом, так и на кафедре. Студенты нашей кафедры награждались высшими наградами на конкурсах Министерства образования на лучшую студенческую работу (5 наград), все доклады на последних всероссийских конференциях студентов-физиков были отмечены дипломами.

Во всех случаях речь шла о фундаментальных исследованиях. В частности, были получены уникальные данные о переходе геликоидальной структуры тербия в верную фазу под воздействием внешнего магнитного поля, проведено комплексное исследование точек соизмеримости магнитных и решеточных периодов в другом редкоземельном металле – эрбии, изучена при помощи СКВИД-магнитометра фаза спинового стекла в разбавленных сплавах металлов.

Научная работа студентов

Научная работа студентов неразрывно связана с исследованиями, проводимыми в базовом отделе и родственных лабораториях. Результаты как теоретических, так и экспериментальных работ, выполненных студентами и их руководителями, публикуются в научной периодике, докладываются на научных форумах различного уровня – от международных конгрессов до студенческих конференций. Лучшие работы участвуют в конкурсах студенческих научных работ, где неизменно входят в число победителей.

Как указывалось выше, в течение ряда лет мы занимались проблемой фазовых переходов и критического состояния вещества. В рамках одной статьи невозможно изложить содержание нескольких десятков публикаций, посвященных этой тематике, выполненных в течение более чем двадцати лет. За эти годы были заложены основы феноменологической флуктуационной теории фазовых переходов второго рода и критического состояния вещества, проведен целый ряд экспериментов на веществах различных классов. В частности, прекрасным объектом для изучения специфики фазовых переходов являются редкоземельные металлы, в частности характерный для этих элементов (а также их сплавов и соединений) переход в антиферромагнитное длинопериодное состояние, причем магнитный период несоизмерим с параметром кристаллической решетки. В то же время при изменении температуры возникают точки соизмеримости. Ограничимся перечислением основных результатов, полученных при изучении РЗМ.

Были получены подробные экспериментальные данные о свойствах антиферромагнитных РЗМ в окрестности точки Нееля. Анализ результатов привел к выводу, что

фазовый переход порядок–беспорядок как в чистых металлах (Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm), так и в близких к экваторному составу сплавах Tb–Ho, носит стадийный характер. Ниже точки Нееля поведение измеренных физических величин соответствует флуктуационной теории фазовых переходов. Выше точки Нееля ($T > T_N$) поведение металлов отличается от указанной теории. Показано, что в определенном интервале приведенных температур коррелированные объемы обладают спонтанным магнитным моментом, и что в области таких квазиферромагнитных корреляций магнитная восприимчивость аппроксимируется степенной функцией с показателем, близким к наблюдаемому при ферромагнитном превращении. Интервал соответствующих приведенных температур пропорционален длинам геликоидов для разных металлов.

Обнаружено избирательное влияние примесей на критическое поведение РЗМ. Загрязнения приводят к предсказываемым теорией сдвигу точки перехода в область более низких температур и уширению кривой зависимости восприимчивости от температуры. Параметры указанной кривой находятся в простой связи с характеризующим чистоту металла резистным отношением. Примеси элементов группы железа оказывают более сильное влияние.

Исследование магнитного поведения еще одного редкоземельного металла – европия при низких температурах позволило обнаружить эффекты, свидетельствующие о перестройке антиферромагнитной доменной структуры. Установлено, что при низких температурах эта перестройка носит необратимый характер. Оценены вклады в магнитосопротивление и намагниченность, связанные с этим явлением.

Подробно изучена диаграмма магнитных состояний в эрбии. Показано, что все фазовые превращения, за исключением перехода в точке Нееля, носят достаточно ярко выраженный характер фазовых переходов первого рода. Обнаружены гистерезисные явления вблизи точек перехода из структуры продольной волны спиновой плотности в структуру сложной спирали, а также вблизи точек соизмеримости магнитных и решеточных периодов. Прямые измерения кривых намагничивания привели к выводу о возникновении дополнительной доменной структуры вблизи точек соизмеримости, причем доменные границы оказываются носителями ферромагнитного момента. Предложена микроскопическая модель, позво-

ляющая объяснить появление аномалий электрических, магнитных свойств и особенностей сверхтонкого поля вблизи точек соизмеримости.

Наряду с РЗМ, наше внимание привлекали и другие объекты – ферромагнитные металлы, галоидные кристаллы (в них наблюдались ориентационные переходы), благородные газы и их смеси, в которых изучалось поведение вблизи критической точки жидкость – пар. Существенным достижением явилось создание нового измерительного устройства – сверхпроводящего квантового измерителя магнитного потока – СКВИДа. С его помощью были исследованы магнитные свойства спиновых стекол и сверхпроводящих структур. При помощи другого СКВИД-магнитометра – серийного прибора американского производства – были изучены магнитные характеристики молекулярных магнетиков, элементоорганических соединений, в которых наблюдались многообразные магнитные превращения.

Некоторые работы выполнялись в сотрудничестве с другими кафедрами. Например, мы занимались синтезом сверхпроводящего станнида ниобия в ударных волнах, а также изучением влияния ударноволновой обработки на сверхпроводящие характеристики этого соединения. Изучали третье критическое поле чистого ниобия после ряда технологических переделов с целью отработки оптимальной методики термообработки металла, предназначенного для изготовления сверхпроводящих резонаторов.

После открытия явления высокотемпературной сверхпроводимости внимание отдела и кафедры было сосредоточено на изучении новых объектов. Здесь пригодился накопленный ранее опыт прецизионных измерений тепловых, электрических, гальваномагнитных и магнитных характеристик веществ. Был выполнен большой цикл работ.

Наиболее впечатляющим, на наш взгляд, можно считать исследование гальваномагнитных свойств монокристаллов редкоземельных купратов в сильных, до 150 килоэрстед, магнитных полях. В частности, здесь были обнаружены антиферромагнитные корреляции в нормальной фазе при содержании в кристаллах кислорода ниже оптимальной (с точки зрения достижения максимальной температуры сверхпроводящего перехода) концентрации. Впоследствии этот эффект удалось связать с таким активно обсуждаемым в научной литературе явлением, как псевдощель в спектре электронных состояний.

В последние годы наше внимание было обращено на другие сильно коррелированные электронные структуры, в частности перовскитоподобные кристаллы и окислы переходных и тяжелых элементов. Для объяснения аномального поведения таких веществ были привлечены представления о виртуальных электронных уровнях Фриделя, влиянии неоднородностей структуры, отклонений от стехиометричности состава и флуктуаций электронных компонент спектра.

В 2003 г. под эгидой Научного совета РАН по проблеме «Физика низких температур» было заключено соглашение между УНЦ «Криогеника», УНЦ Омского государственного университета и УНЦ Красноярского государственного университета в содружестве с Институтом физики СО РАН о проведении ежегодного молодежного семинара по сверхпроводимости и смежным проблемам. Соруководители семинара – профессор Л. А. Боярский (Новосибирск), С. Г. Овчинников (Красноярск) и К. Н. Югай (Омск). Семинар проводится поочередно в указанных выше трех городах. В 2005 г. 20 и 21 сентября в Омске состоялся Третий семинар. Опыт прошедших семинаров подтвердил целесообразность нашей инициативы. Научная молодежь получила возможность отличного тренинга устных выступлений, дискуссий и неформального общения. Так называемые «профессорские» доклады содержали обзор ключевых моментов, имеющих в науке о сильно коррелированных электронных системах.

Программа семинара включала как доклады обзорного характера, так и регулярные

сообщения. Стендовые доклады не предусматривались. Большинство работ было представлено научной молодежью – студентами старших курсов, аспирантами, молодыми кандидатами наук. Тезисы докладов не публиковались. Всего было заслушано 25 докладов. Следующий семинар планируется провести в Новосибирске в октябре 2006 г.

Анализ существующей ситуации и логика развития УНЦ «Криогеника» приводят нас к следующим выводам. Выполнение соискателями степени магистра требует овладения все более разнообразными знаниями. Модернизация существующих курсов не всегда в состоянии обеспечить нужный результат, тем более что тематика магистерских диссертаций достаточно разнообразна. Один из выходов, который широко используется, – перевод некоторых студентов на индивидуальные планы, заменяя часть спецкурсов лекциями других кафедр. Однако в настоящее время наметилась и несколько иная тенденция. В лабораториях ИНХ и некоторых других институтах химического профиля имеется насущная потребность широкого применения физических методов изучения новых материалов. Речь идет о методах структурного, рентгеноспектрального анализа, разных видов оптической и радиоспектроскопии. Проблема может быть решена, если разработать и внедрить некоторое количество лабораторных задач для имеющегося спецпрактикума.